

600MPa급 자동차용 고장력강판의 CO₂ 레이저 용접부의 특성에 미치는 보호가스의 영향

한태교 · 이봉근 · 강정윤

부산대학교 공과대학 재료공학과

Effect of shield gas on the characteristics of CO₂ laser welded 600MPa grade high strength steel

Tae-Kyo Han, Bong-Keun Lee and Chung-Yun Kang

Department of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

Abstract

The effect of shield gas on the weldability, mechanical properties and formability of CO₂ laser weld joint in 600MPa grade high strength steel was investigated. Bead on plate welds were made under various welding speed and shield gas. Tensile test was carried out under the load of perpendicular and parallel direction to the weld line. Formability of the joint was evaluated by Erichsen test.

As the welding speed increases, the porosity fraction decreases. The porosity fraction in the joint used Ar-50%He mixed gas as a shield gas was lower than that of the joint used Ar gas. Hardness at the weld metal of full penetrated joint was nearly equal to that of water quenched raw metal. In a tensile test under a perpendicular load to the weld axis, strength and elongation of joint produced by optimum condition were nearly equal to those of base metal. However, the strength of joint in a tensile test under a parallel load to weld axis was higher than that of raw metal, but the elongation of joint was lower than that of raw metal. Elongation and formability were further increased by the method of using Ar+He mixed gas as a shield gas as compared with Ar gas. Formabilities of joints were recorded ranging from 58% to 70% of that of base metal with different shield gases.

Key Words : 600MPa high strength steel, CO₂ laser, shield gas, mechanical property, formability

1. 서 론

최근 자동차산업은 자동차의 기본적인 이송성에 더불어 안락함, 편의성 및 안전성을 추구하는 소비자의 욕구를 충족시키기 위해 자동차에 안전 및 편의부품을 추가적으로 장착함으로써 자동차의 중량이 점점 증가하는 추세에 있다. 반면 전세계적인 에너지 및 환경규제는 자동차업계로 하여금 자동차의 연비향상 및 배기가스를 줄이도록 함으로서 결과적으로 자동차의 중량은 감소되어야 한다. 따라서, 차세대 자동차산업에서의 핵심적인 과제는 소비자의 욕구를 충족시키면서 자동차의 중량을 감소시키는 것이다. 자동차의 중량을 감소시키는 방법으로 철강업계에서 크게 대두되고 있는 것은 자동차용 강판의 약 25%를 차지하고 있는 샤시부품에 고장력강을 사용하는 것이다. 경량화를 위해서 두께를 감소시키는 방법이 있지만, 강도가 함께 저하됨으로서 안전성의 문제가 야기된다. 따라서 고장력강을 사용하게 되면 두께를 줄이더라도 현재 사용되고 있는 강재와 동등한 강도를 얻을 수 있기 때문에 결국 고장력강의 사용은 필연적일 수밖에 없다. 이런 시대적 추세에 따라 전문가들은 자동차용 고장력강의 적용수준을 2000년도의 38%에서 2005년도에는 76%로 2배이상 증가할 것으로 전망하고 있다¹⁻³⁾.

한편 레이저용접은 고밀도의 집속된 에너지를 열원으로 하는 광응용기술로서, 타 용접속도에 비해 용접속도가 빠르면서 입열량이 작아 열에 의한 변형이 작은 이점을 가지고 있고, 용접비드와 열영향부가 매우 좁아 접합이 어려운 형상이나 재료도 용접이 가능한 유연성을 가지고 있다^{4,5)}. 이런 특성으로 인해 최근 레이저 용접의 중요성이 확대되고 있으며, 현재 자동차생산 기술의 선진화 대열에 있는 일본, 미국 등에서는 이미 레이저 용접기술을 도입하여

자동차 산업의 많은 부분에 응용을 도모하고 있는 것으로 알려져 있다.⁶⁾

그러나 고장력강의 레이저 용접에 대한 체계적인 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 600MPa급 고장력강의 레이저 용접기술에 대한 기초연구로서 CO₂ 레이저로 비드용접하였을 때 용입특성 및 결합, 기계적 성질 및 성형성에 미치는 보호가스의 영향을 검토하고자 한다.

2. 실험방법

실험에 사용한 재료는 화학조성이 0.08C-1.5Mn-0.5Si-0.04Ti-Fe(wt%)이고 인장강도가 약 600MPa인 두께 1.2mm 냉연강판을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 레이저 용접 장치는 최대출력이 6kW인 독일 TRUMPF사(TLF6000 turbo)의 CO₂ 레이저 장치를 사용하였다. 용접은 출력 6kW에서 모재를 50(W)×200(L) 크기로 절단한 후 산세처리하여 압연방향으로 비드용접을 실시하였다. 보호가스는 Ar가스, He가스, Ar+He혼합 가스를 사용하였고, 유량은 선행 실험에서 최적조건인 20ℓ/min으로 하였다. 용접부의 매크로조직은 2%-Nital, HNO₃ 2ml + Ethanol 100ml로 298K에서 10sec간 부식시켜 실체현미경으로 관찰하였고, 용접부 미세조직은 광학현미경과 주사식전자현미경을 이용하여 관찰하였다. 기공율은 현미경영상분석장치(Image analyser)를 이용하여 전체면적에 대한 기공면적의 비율로 측정하여 정량화하였다. 이때 실험의 정확성을 기하기 위하여 200mm 용접한 것의 중앙부에서 5mm씩 4개로부터 평균을 구하여 나타내었다. 비드단면의 경도는 미소경도기를 사용하여 하중 2.94N, 하중유지시간 15sec, 측정 간격은 150μm로 하여 측정하였다. 인장시험은 박판재의 인

장시험에 적합한 JIS 5호 시험편으로 용접선에 수직인 방향과 수평인 방향으로 가공한 후 Instron사의 인장시험기를 이용, 크로스헤드스피드 5mm/min의 조건으로 신율계를 부착 후 시험하였다. 성형성은 박판만능시험기를 사용하여, 에릭선(Erichsen) 시험으로 평가하였다. 시험편은 에릭선 시험편 2호를 사용하였고, 펀치의 상승속도는 7mm/min로 설정하였다. 인장시험 및 성형성 시험은 각 조건별로 최소 5개씩 시험하여 정확성을 기하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용접부의 결함

그림 1은 He 및 Ar을 보호가스로 사용하였을 때 용접속도에 따른 대표적인 용접부 횡단면을 나타낸다. 완전용입이 일어나는 최대용접속도는 He을 사용한 경우는 10m/min였고, Ar을 사용한 경우는 8m/min로서, He의 경우가 더 높은 속도까지 완전용입이 일어났다. 완전용입이 일어나는 용접속도구간에서는 용접속도가 증가할수록 비드의 폭이 감소하였고, 같은 용접속도에서는 He을 보호가스로 사용한 경우가 Ar의 경우보다 비드의 폭이 다소 좁게 나타났다. 불완전용입이 일어나는 용접속도에서는 용접비드에 약간의 언더컷이 관찰되었다.

용접부 내부의 결함 유무를 살펴본 결과, 기공이외의 결함은 관찰되지 않았다. 보고된 바로도 탄소량 0.2%이하의 강을 CO₂ 레이저 용접할 경우 기공이외의 결함은 발생하지 않는다고 알려져 있다.⁷⁾ 그림 2는 용접부내부에 기공을 다량 포함하고 있는 용접조건에 대하여 용접부의 종단면을 대표적으로 나타낸 것이다. 기공의 형상은 구형이며, 비드 상부에 존재하는 것을 볼 수 있다.

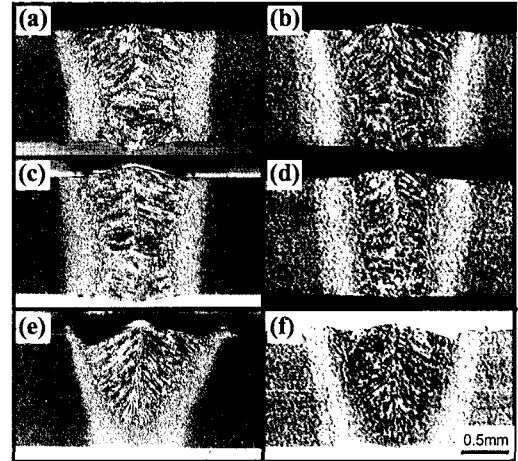


Fig.1 Cross-sections of bead with different welding speed and shield gas.

(a)5m/min-Ar, (b)5m/min-Ar,
(c)7m/min-Ar, (d)7m/min-He,
(e)10m/min-He, (f)11m/min-He

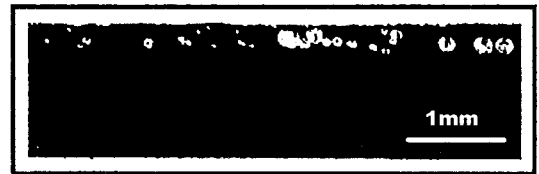


Fig. 2 Longitudinal section of the bead with a welding speed of 5m/min in Ar

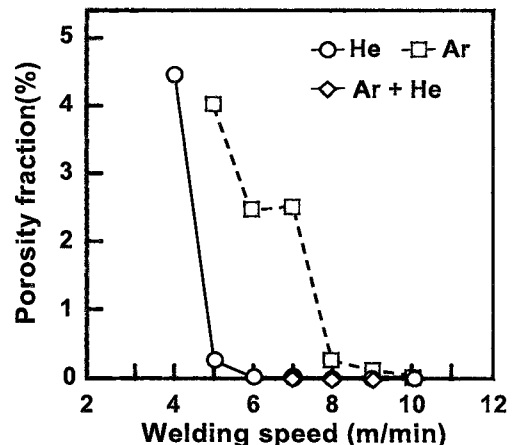


Fig. 3 Change of a porosity fraction with different welding condition

그림 3은 용접조건에 따른 기공 분율을 영상분석법으로 측정하여 나타낸 것이다. He을 보호가스로 사용한 경우에는 용접속도 4m/min에서 최고 값을 나타낸 후 용접속도 5m/min에서 급속히 감소하여, 6m/min이상에서 기공이 전혀 관찰되지 않는다. 반면 Ar을 보호가스로 사용한 경우, 용접속도 5m/min에서 최고 값을 나타내고, 용접속도가 증가함에 따라 기공 분율이 감소하는 경향은 He의 경우와 동일하지만, 완전용입이 일어나는 전 용접속도구간에서 He에 비해 상대적으로 큰 기공 분율을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다.

보호가스에 따라 정도의 차이는 있지만, 저속 용접에서 기공이 다량 존재하고, 용접속도가 증가함에 따라 기공율이 감소하는 이유를 고찰하면 다음과 같다. 강의 레이저 용접에서 용접속도에 따른 기공 발생을 X-Ray 분석한 Matsunawa의 연구 결과에 의하면⁸⁾, 저속도의 용접에서는 용융금속이 응고벽면을 따라서 후면으로 긴 거리를 유동하게 되며, 이때 최초 키폭 선단부에서 발생한 기포도 용융금속의 유동과 함께 응고벽면을 따라 긴 거리를 이동하게 된다. 따라서 용융금속이 응고하는 동안에 기공이 외부로 빠져나가지 못하고 갇히기 쉽기 때문에 기공이 발생할 가능성이 높다. 반면 고속 용접에서는 용융금속이 직상방향으로 이동하고, 증발물질도 직상방향으로 분출하며 분출하는 증기압으로 인해 외부가스의 혼입도 어렵게 된다. 결국 기포가 직상방향으로 키폭에 따라서 짧은 시간에 외부로 분출되기 때문에, 기공이 거의 발생하지 않은 것으로 보고 되어 있다.

3.2 용접부의 경도와 미세조직

그림 4는 용접속도 7m/min의 조건에서 용접부중심선을 기준으로 150 μ m간격으로 비커스 미소경도를 측정하여 정리한 것이다. Ar과 He 모두 용접금속에서 일정한 최

고값을 나타내지만, HAZ에서는 모재 쪽으로 갈수록 경도가 감소하는 경향을 나타내고 있다.

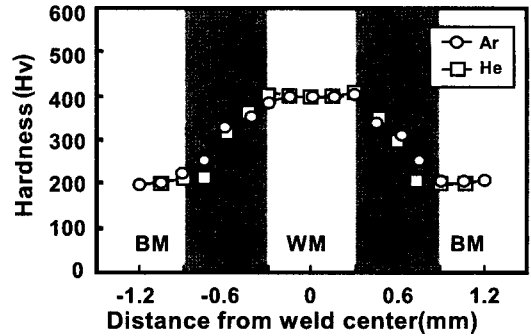


Fig. 4 Hardness distribution near weld zone with a welding speed of 7m/min

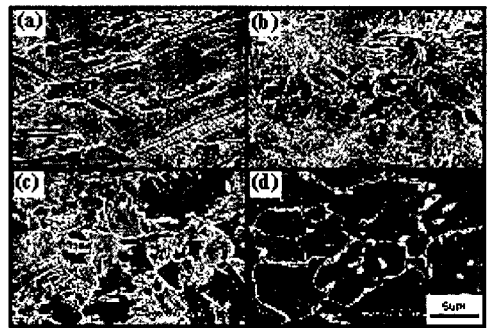


Fig. 5 Microstructure of each area near weld zone with a welding speed of 7m/min in He : (a)weld metal, (b) HAZ near weld metal, (c)HAZ, (d) base metal

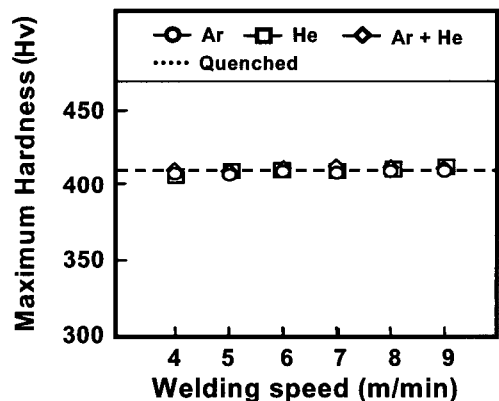


Fig. 6 Maximum hardness with a welding speed

그림 5는 상기와 같은 정도분포를 나타내는 이유를 알아보기 위하여, 용융부, 용융부에 인접한 열영향부, 열영향부 중심, 모재에 대한 SEM조직을 나타낸 것이다. 용융부는 마르텐사이트 조직이고, 용융부에 인접한 열영향부에서는 용융부에 비해 상대적으로 작은 크기의 마르텐사이트와 그 패킷 주위에 다각형의 페라이트가 소량 관찰된다. 모재에 인접한 열영향부에서는 베이나이트 조직과 다량의 페라이트가 관찰된다. 이상의 결과로부터 용융부에서 최대경도가 얻어지는 것은 마르텐사이트로 구성되어 있기 때문이며, 모재 쪽으로 갈수록 경도가 감소하는 것은 마르텐사이트의 감소와 더불어 페라이트 량의 증가에 인한 것임을 알 수 있다.

시험한 모든 용접속도의 정도분포는 7m/min의 것과 모두 같은 경향을 나타내었으므로, 용접속도에 따른 최대경도변화만을 조사하여 보았다. 그 결과를 그림 6에 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 최대경도는 모든 조건에서 거의 동일하다. 그림에서 점선은 1223K로 고주파로 급속가열 후 수냉한 시편의 정도값을 나타낸다. 용접부의 최대경도값과 거의 동일함을 알 수 있다. 이 사실은 저속의 레이저용접에서 냉각속도는 수냉 시의 냉각속도와 동일하거나, 빠르다라는 것을 의미한다.

3.3 용접부의 인장성질

그림 7은 용접선에 수직하게 인장시험한 경우, 보호가스 및 용접속도에 따른 인장성질을 나타낸다. 항복강도, 인장강도, 연신율은 모재의 것과 거의 같은 값을 나타내고 있으며, 용접속도 및 보호가스에 대한 영향은 거의 나타나지 않고 있다. 이것은 용접조건에 관계없이 모든 시험편이 모재에서 파단이 발생했기 때문에 모재의 인장성질과 유사한 값을 나타내는 것으로 생각

된다.

한편, 용접선에 평행하게 인장시험 한 경우, 시험편의 상하의 것이 모두 컵 형태로 파단이 발생하였고, 모재부와 용접부의 연신 길이가 달랐다. 그래서 용접부와 모재부의 연신율을 각각 측정하였다. 그림 8은 용접선에 평행하게 인장시험 한 경우, 용접조건에 따른 인장성질을 나타낸 것이다. 항복강도, 인장강도는 용접속도와 사용한 보호가스와 무관하게 모재의 강도와 같거나 조금 높다. 그러나 연신율은 용접속도 및 보호가스의 영향이 큰 것을 알 수 있다. 즉 Ar가스를 사용한 시험편은 He 가스를 사용한 것보다 연신율이 아주 낮고, 용접부와 모재부의 연신 차이도 크다. 또한 용접속도가 증가할수록 증가하는 경향이 있음을 볼 수 있다. Ar+He혼합가스 사용한 경우는 He의 것과 Ar의 것의 중간사이의 값을 나타내고 있다.

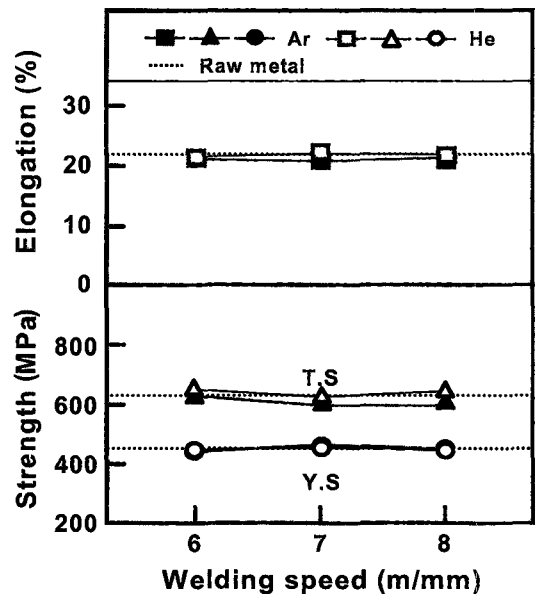


Fig. 7 Tensile property under a perpendicular load to weld axis

모재와 용접부의 연신율이 다르게 나타나는 이유를 알아보기 위하여, 인장시험 동안에 시험편 형상 변화와 하중-연신을 곡선과의 관계 관찰하여 보았다. 그림 9는 Ar을 보호가스로 용접한 시험편의 형상 변화를 촬영한 것과 이에 대응하는 하중도-연신 곡선을 나타낸 것이다. 인장초기에는 항복점을 지나 원소재와 같이 시편 전체가 균일연신을 하다가, A에서 넥킹이 발생하고(a), B에 도달하면, 비드부에서 균열이 발생하고(b), 균열이 성장하면서, 실제단면적이 감소함에 따라 하중도 저하하지만, 모재부는 계속해서 연신된다(c). 결국 D에서 최종 파단이 일어나게 된다(d). 이상의 결과를 요약하면 비드부에서 우선적으로 파단이 일어나고, 비드부에서 발생한 균열이 성장하는 동안에도 모재부는 계속해서 연신되어 최종 파괴가 일어나기 때문에 모재부와 비드부의 연신율 차, ΔE 가 발생하는 것을 알 수 있다.

이것은 용접선에 평행한 인장시험 한 경우, 용접부의 인장성질은 비드부 자체의 인장성질과 비드부와 모재부의 체적비에 의해 좌우된다는 것을 의미한다. 비드부의 강도는 이 부분에서 경도가 같기 때문에 거의 같다고 가정할 수 있으나, 비드부 내에 기공이 존재하면 저하할 것으로 예상된다. 전술한 바와 같이 용접속도가 증가할수록 기공율이 감소하며, 비드 폭도 감소하였다. 특히 Ar보호가스를 사용한 경우, 용접속도에 따른 연신율의 변화와 기공률의 변화는 양호한 상관관계가 있음을 알 수 있다. 하지만 He의 경우 기공이 관찰되지 않는 조건이기 때문에 기공으로 인한 것이라고 말할 수 없다.

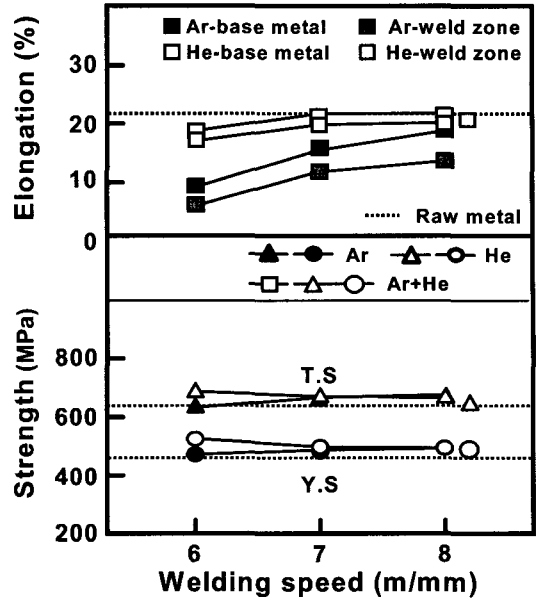


Fig. 8 Tensile property under a parallel load to weld axis

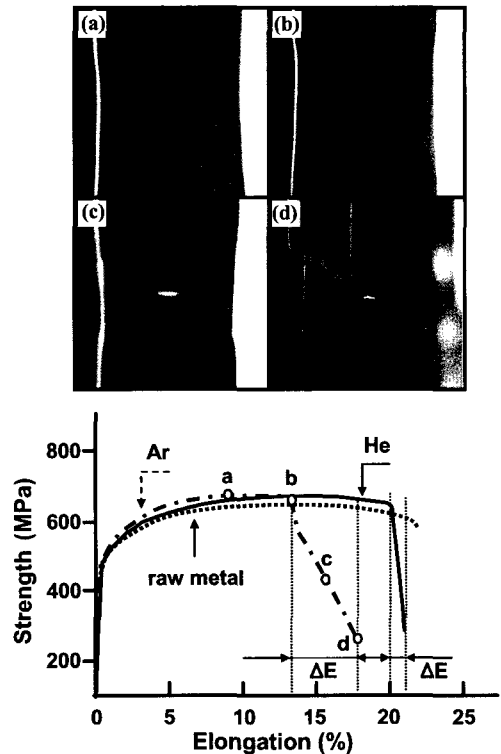


Fig. 9 Change of specimen appearance during tensile test and the corresponding strength-elongation curves of each welding condition

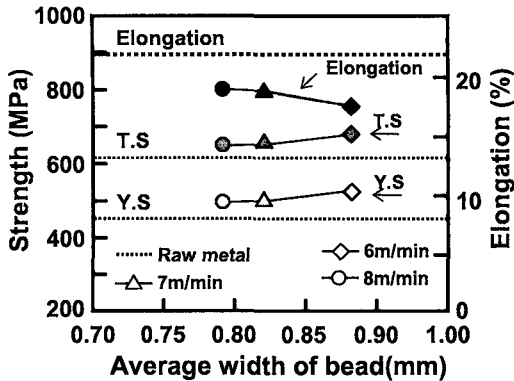


Fig. 10 Change in tensile property with the average width of bead

그림 10은 He을 보호가스로 사용한 경우, 비드 폭과 인장성질과의 상관관계를 나타낸 것이다. 비드 폭이 증가할수록, 강도는 증가하지만 연신율은 감소하고 있음을 볼 수 있다.

이상의 결과로부터 연신율에 미치는 주요 인자는 기공이며, 다음으로는 비드 폭임을 알 수 있고, 또한 기공은 용접부의 강도에 거의 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

3.4 용접부의 성형성

실제 생산공정에 적용되는 가공은 인장시험과 같은 단축이 아닌 복잡한 다축응력을 받게 되므로 성형성을 평가하기에는 인장시험만으로는 부족하다. 따라서 다축응력 시험인 에릭선 시험으로 성형성을 평가하였다. 용접은 인장시험 결과를 바탕으로, 연신율이 가장 양호한 조건인 용접속도 8m/min로 실시하였다. 그림 11은 보호가스 종류에 따른 성형높이와 모재대비 용접부의 성형율을 동시에 나타낸 것이다. 이 시험에서도 균열은 평행 인장시험과 동일하게 비드부에서 발생하였다. 성형성은 Ar(58%), Ar+He(68%), He(70%)의 순으로 높다. 또한 이 순은 수평 인장 시험의 연신율이 양호한 순서와도 같다. 결국 성형성은

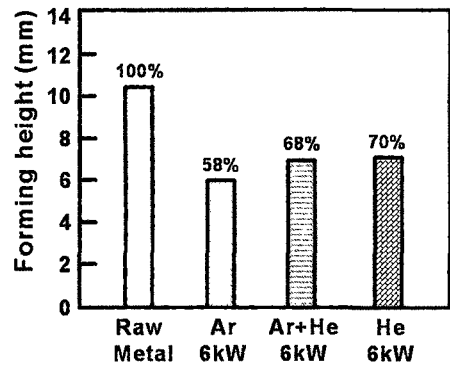


Fig. 11 Effect of shield gas on forming height in Erichsen test

용접부의 연신율과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

자동차 경량화를 위한 600MPa급 고장력강을 CO₂ 레이저로 비드용접하였을 때, 용입특성, 결합, 기계적성질 및 성형성에 미치는 보호가스의 영향에 대해 검토하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 완전용입이 일어나는 최대용접속도는 Ar의 경우 8m/min였고, He의 경우 10m/min였다.
2. 용접부에는 기공이 존재하였는데 기공감수성은 보호가스에 대해서 Ar>Ar+He = He의 순으로 나타났고, 기공율은 용접속도가 증가할수록 감소하였으며, Ar+He혼합가스 및 He의 경우 6m/min이상의 용접속도에서는 기공이 관찰되지 않았다.
3. 경도는 모든 보호가스에서 용접금속에서 최대경도를 나타내고, 모재쪽으로 갈수록 감소하였으며, 전 용접조건에서 최대경도는 동일하였다.
4. 용접선에 수직하게 인장하였을 때는 보호가스에 관계없이 인장물성은 모재의

것과 거의 동일한 값을 나타냈다.

5. 용접선에 수평하게 인장하였을 때는 항복강도 및 인장강도는 모든 보호가스에서 모재보다 큰 값을 나타내었지만, 연신율은 모재보다 낮은 값을 나타내는데 He을 보호가스로 사용한 경우가 Ar을 사용하였을 때 보다 높은 값을 나타냈다.
6. 성형성은 He>Ar+He>Ar의 순으로 나타났고, 모재대비 성형율은 각각 70%, 68%, 58%였다.

참고문헌

1. 정우창, 정진환 : 대한금속학회지, 제26권, 10호, (1988), p999-1005
2. 정우창 : 자동차공학회지, 제18권, 5호, (1996), p12-23
3. 김정오, 서정, 한유희, 김하영: 한국자동차공학회논문집, 제4권, (1996), p59-69
4. J. K. Kristensen "potential and challengers in laser welding structural steels", The Industrial Laser Handbook, pp74-80, 1993
5. C. M. Banas : The Industrial Laser Annual Handbook, Tulsa, Pennwell Pub. Co., (1986), p69-86
6. 서 정, 한유희 : 대한용접학회지, 제12권, 제2호, (1994), p49-63
7. Tae Kyo Han, Sing Sang Park, Chung Yun Kang : Key Engineering Materials, Vol. 270-273(2004), p2365-2370
8. 瀬渡, 金種道, 水谷, 編山, 松 : 第44回 レーザ加功研究學會論文集, (1998), p1998